بررسی خواص انتقال در بتن‌های توانمند حاوی پوزولان متاکائولن در مقایسه با میکروسیلیس★

محمد شکرچی‌زاده[۱] مهدی ولی‌پور[۲] فرهاد پرگر[۳]

چکیده امروزه استفاده از بتن‌های توانمند در صنعت ساخت‌وساز به یک ضرورت تبدیل شده است. هم‌چنین با توجه به عدم دقت در طراحی و ساخت سازه‌های بتنی در مناطق خورنده، مشکلات متعددی را از جمله کاهش شدید عمر مفید و تخریب زودرس این سازه‌ها موجب شده‌است که استفاده از بتن‌های توانمند می‌تواند یکی از راه حل‌ها باشد. در سال‌های اخیر برای تولید بتن‌های با خواص مکانیکی و پایایی مناسب به‌صورت گسترده از پوزولان‌ها استفاده می‌شود. مهم‌ترین افزودنی مورد استفاده در کشور میکروسیلیس می‌باشد، در عین حال با توجه به گسترش استفاده از پوزولان‌ها در سطح دنیا بررسی عملکرد پوزولان‌های جایگزین نظیر متاکائولن اهمیت خاصی پیدا کرده است. در این مقاله با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب، حجم حفرات، جذب آب مویینه، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری گاز، خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن‌های توانمند حاوی متاکائولن با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی سیمان در مقایسه با میکروسیلیس با ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی سیمان مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که متاکائولن در بهبود پارامترهای دوام بتن بخصوص در کاهش جذب آب مویینه، افزایش مقاومت الکتریکی و مقاومت نفوذپذیری گاز بهتر از میکروسیلیس عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی بتن توانمند، خواص انتقال، متاکائولن، میکروسیلیس، خواص مکانیکی، خواص پایایی.

Comparing the performance of metakaoline with silica fume on properties of high performance concrete

M. Shekarchizadeh M. Valipour F. Pargar

Abstract *Nowadays, the use of high performance concrete is rapidly increasing due to its capability of being a good substitute for poorly constructed structures and also concrete structures in corrosive environments which suffer from short life span and immature failure. However, in the last decades the pozzolans are greatly used in order to produce concretes with improved mechanical properties and durability. One of the most usable pozzolans is silica fume and metakaoline. In present paper, the mechanical properties and durability of high performance concretes containing metakaolin of 5, 10 and 15% of cement replacement is compared to those containing silica fume with 5, 7.5 and 10 % of cement replacement using compressive strength test, water absorption, void volume, sorptivity, electrical resistance and gas permeability tests. According to the results, metakaoline showed better results compared to silica fume regarding improvement of mechanical properties and durability of high performance concretes and it is found that the optimum content of metakaoline is about 10 to 15% of cement replacement which can make it a good substitute for silica fume.*

Keywords High performance concrete, Transport properties, Metakaoline, Silica fume, Mechanical properties, Durability properties

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۱٤ می‌باشد.

(۱) دانشیاردانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

(۲) کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

(۳) کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

مقدمه

امروزه بـه دلایـل مختلـف اسـتفاده از پـوزولان‌هـا در صنعت بتن یک ضرورت محسوب می‌شود. از یک سو با توجه به ضرورت مصرف متعادل و کـاهش مصـرف انرژی، منابع طبیعی و حفظ محیط زیسـت، و از سـوی دیگر به دلیل آلاینده بودن تولید سیمان ایجاب می‌شود که از مصرف سیمان در کشور کاسته شود بدون آن‌کـه لطمه‌ای به حجم ساخت و سازها وارد شود. هم‌چنـین نیاز به بتن مقاوم و با دوام در ساخت سـازه‌هـای بتنـی به‌ویژه در مناطق خورنده، برای افزایش عمر مفیـد ایـن سازه‌ها و کاهش هزینه‌هـای تعمیـر و نگهـداری آن‌هـا حس می‌شود که از جمله دلایـل ضـرورت اسـتفاده از پوزولان‌ها در ساخت بتن مـی‌باشـد. میکروسـیلیس از جمله افزودنی‌های شناخته شده و پر کاربرد می‌باشد که اثرات مثبت آن بر بهبود خصوصـیات مکـانیکی و دوام بتن مشخص شده است. بـا ایـن حـال میکروسـیلیس، خاکسترباد‌ی، روباره و غیره محصولات فرعـی صـنایع دیگر هستند، به همین جهت اقدام خاصی در خصوص بهینه‌سازی آن‌ها نمی‌توان انجام داد. بنابراین الزامـات و معایب ذکر شـده، شـناخت و اسـتفاده از نسـل جدیـد پوزولان‌ها را ضروری می‌سازد. از جمله این پوزولان‌ها متاکائولن می‌باشد که فرآیند تولید آن کنترل شده‌اسـت و به‌عنوان یک پوزولان مهندسی شده شناخته می‌شـود. تولید متاکائولن با آلاینـدگی کـم‌تـر و مصـرف انـرژی محدودتر همراه است [۱]. در چند سال اخیر مطالعـات گسـترده‌ای در مـورد اسـتفاده از متاکـائولن بـه‌عنـوان جایگزین بخشی از سیمان انجام شده است [۵-۱]. این مطالعات نشان می‌دهنـد کـه جـایگزینی متاکـائولن بـا سیمان، موجب بهبود خصوصـیات مکـانیکی و پایـایی بتن می‌شـود. هـم‌چنـین بـا توجـه بـه مشـکلات دوام سازه‌های بتنی موجود در منطقه خلیج فارس، متاکائولن می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای بهبود شرایط موجـود در منطقه‌ی خلیج فارس باشد. به‌همین منظور در انجام این تحقیـق از مصـالح موجـود در منطقـه‌ی خلـیج فـارس استفاده شده است تا نتایج به‌دست آمده تا حد امکان با شرایط موجود در منطقه تطابق داشته باشد. در تحقیـق حاضرعملکرد پوزولان‌متاکـائولن (۵، ۱۰ و ۱۵ درصـد جایگزینی سیمان) در مقایسه با میکروسـیلیس (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی سیمان) با انجـام آزمـایش‌هـای مقاومت فشاری، جذب آب، حجم حفرات، جذب آب مویینه، مقاومت الکتریکـی و نفوذپـذیری گـاز بررسـی شده است. نتایج به‌دسـت آمـده از ایـن تحقیـق نشـان می‌دهـد کـه در مجمـوع خـواص انتقـال بـتن حـاوی متاکائولن به‌تر از میکروسیلیس بوده است.

معرفی خواص بتن حاوی متاکائولن

متاکـائولن یکـی از جدیـدترین پـوزولان‌هـا در تولیـد بتن‌های توانمند محسوب می‌شود. مواد خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کـائولن مـی‌باشـد. کـائولن یـک ماده‌ی معدنی بسیار ریـز سـفید و رسـی اسـت کـه در دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه بیش‌تر آب جذب شده‌ی خود را از دست می‌دهد[۱]. دمایی که در آن کائولینیـت کـه اصـلی‌تـرین جـزء تشـکیل دهنـده‌ی کـائولن اسـت، بـه‌واسـطه‌ی دی هیدراکسیونیزاسـیون آب از دسـت می‌دهد، بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گـراد مـی‌باشـد. به‌منظور تولید متاکائولن، رس کائولن را تـا محـدوده‌ی دمـایی ۷۰۰ تـا ۹۰۰ درجـه حـرارت مـی‌دهنـد [2]. متاکائولن به‌عنـوان یـک محصـول بـا پایـه‌ی سیلیسـی می‌باشد که در واکنش با $Ca(OH)_2$ در دمـای معمـولی ژل C-S-H تولید می‌کنـد. متاکـائولن هـم‌چنـین دارای آلومینـا مـی‌باشـد کـه بـا CH واکـنش داده و فازهـای آلومینـاتی حـاوی $C4AH_{13}$، C_2ASH_8 و C_3AH_6 را تولید می‌کند [3,4]. مطالعات متعددی توسـط محققـان در خصـوص اثـرات جـایگزینی سـیمان بـا پـوزولان متاکائولن بر بهبود خصوصیات مکانیکی و پایـایی بـتن انجام شـده اسـت کـه در زیـر بـه مختصـری از نتـایج حاصل اشاره می‌شود:

کارپذیری. Wild و همکارانش[۵] کارپذیری بتن‌های حاوی متاکائولن را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های بتنی با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد متاکائولن برای این منظور ساخته شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان اسلامپ با افزایش مقدار جایگزینی متاکائولن به‌همراه افزایش فوق روان‌کننده است [5]. هم‌چنین Brook و Johar [6] اسلامپ و زمان گیرش بتن‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را در مقایسه با بتن شاهد و با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ گزارش کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان جایگزینی پوزولان، اسلامپ کاهش و زمان گیرش افزایش می‌یابد [6].

ریز ساختار. Bredy و همکارانش [7] تخلخل و اندازه‌ی حفرات خمیر سیمان حاوی متاکائولن را مورد بررسی قرار دادند. خمیر سیمان با مقادیر جایگزینی صفر تا ۵۰ درصد آماده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی کم‌تر از ۲۰ درصد، تخلخل کل را کاهش می‌دهد. ولی افزایش جایگزینی به بیش از ۳۰ درصد موجب افزایش تخلخل می‌شود. در تحقیقی دیگر Khatib و Wild [8] تخلخل و اندازه‌ی حفرات خمیر سیمان حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد را با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ تعیین کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش سن عمل‌آوری حجم حفرات کاهش و خمیر سیمان حاوی متاکائولن ریز ساختار به‌تری پیدا می‌کند. هم‌چنین Courard و همکارانش[9] جذب آب ملات‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولن را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کم‌ترین مقدار جذب آب در بین تمامی نمونه‌ها، مربوط به نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن می‌باشد.Razak و همکارانش [10] نیز در سال ۲۰۰٤ اثر متاکائولن و میکروسیلیس را در مورد جذب آب سطحی، جذب آب و جذب مویینه مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که میکروسیلیس و متاکائولن به‌طور قابل ملاحظه‌ای جذب سطحی، جذب آب و جذب مویینه را کاهش می‌دهند.

مشخصات مکانیکی. Wild و همکارانش [5] اثر درصدهای مختلف متاکائولن را بر مقاومت فشاری بتن‌های حاوی این پوزولان مورد بررسی قرار دادند. درصدهای جایگزینی متاکائولن شامل ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد با نسبت آب به سیمان ۰/٤۵ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که متاکائولن باعث افزایش مقاومت در همه‌ی سنین می‌شود اما درصد جایگزینی بهینه در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. هم‌چنین Curcio و همکارانش [11] نقش متاکائولن را در ملات‌های پر مقاومت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان از افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی متاکائولن نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس تا سن ۲۸ روز دارد. در حالی که در سنین ۹۰ تا ۱۸۰ روز نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن مقاومت‌های فشاری یکسانی از خود نشان داده‌اند. در تحقیقی دیگر Brooks و Johari [6] مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن افزایش می‌یابد[6]. از طرفی Poon و همکارانش [12] نشان دادند که مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی ۵ تا ۲۰ درصد متاکائولن در همه‌ی سنین ۳ تا ۹۰ روز بیش‌تر از نمونه‌ی شاهد است. با این حال نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن به‌ترین عملکرد را در بین سایر نمونه‌ها داشته است. در این تحقیق نمونه‌های حاوی SF و FA در سنین اولیه، مقاومت فشاری کم‌تری نسبت به نمونه‌ی شاهد دارا بودند. ولی در دراز مدت تمامی نمونه‌های حاوی پوزولان افزایش مقاومت داشته‌اند. بنابراین در سنین اولیه‌ی عملکرد متاکائولن در بهبود مقاومت به‌تر از میکروسیلیس بوده است. در همین راستا -Potgieter

Vermaak [13] مقاومت فشاری را در ملات‌های حاوی متاکائولن با درصد جایگزینی ۱۰ تا ۳۰ و نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق بدین صورت گزارش شده است که به‌ترین حرارت اکتیواسیون برای تولید متاکائولن از کائولن با دمای بیش از ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. هم‌چنین مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل‌آوری و درجه‌ی حرارت هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. Qian و Li [14] نیز در سال ۲۰۰۱ مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی متاکائولن مقاومت کششی نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد. هم‌چنین جایگزینی ۵ درصد متاکائولن کم‌ترین اثر را در بهبود مقاومت خمشی داشته است. در حالی که در جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد در سن ۲۸ روز به‌ترتیب ۳۲ و ۳۸ درصد و در ۸۰ روز ۱۳ و ۲٤ درصد افزایش مقاومت خمشی مشاهده شده است. بنابراین بهبود محسوس در مقاومت خمشی در درصد جایگزینی ۱۰ تا ۱۵ حاصل گردیده است. در تحقیقی دیگر Courard و همکارانش [9] اثر متاکائولن بر مقاومت خمشی ملات را با جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که با جایگزینی متاکائولن مقاومت خمشی بتن بهبود می‌یابد.

دوام بتن. Brooks و Johari [٦] اثر متاکائولن را بر خزش و جمع‌شدگی در بتن‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی متاکائولن و با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت جمع‌شدگی خودبه‌خودی با افزایش مقدار جایگزینی متاکائولن کاهش می‌یابد. در حالی که در درازمدت این مقدار با افزایش مقدار متاکائولن افزایش می‌یابد. هم‌چنین حضور متاکائولن باعث کاهش خزش می‌شود که این کاهش را می‌توان با متراکم کردن ریز ساختار و حفرات بتن، ماتریس خمیر مستحکم و بهبود سطح بین خمیر و سنگدانه توسط متاکائولن توجیه کرد. در تحقیق دیگری Boddy و همکارانش [15] نفوذ یون کلر را در ۳٦۵ و ۱۰۹۵ روز پس از رویارویی اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با گذشت زمان رویارویی و کاهش نسبت آب به سیمان و با افزایش درصد جایگزینی HRM میزان نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد. هم‌چنین Courard [9] اثر افزودن متاکائولن با جایگزینی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد را بر میزان نفوذ یون کلر در ملات مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج حاصل به‌ترین عملکرد مربوط به متاکائولن با ۲۰ درصد جایگزینی بوده به طوری که بعد از یکسال تقریباً نفوذ یون کلر مشاهده نشده است. از طرفی با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن از ۱۰ به ۱۵ درصد شاهد کاهش ۱۷۰ درصدی در ضریب انتشارپذیری بودند. هم‌چنین اثر متاکائولن بر مقاومت خوردگی ملات نیز توسط Batis [١٦]مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مسلح حاوی درصدهای مختلف متاکائولن پس از عمل‌آوری در معرض محلول NaCl با غلظت ۳/۵ درصد قرار داده شدند. برای نمونه‌های مورد نظر آزمایش مختلفی انجام شد که نتایج حاصل نشان می‌دهند که نمونه‌های حاوی متاکائولن با ۱۰ درصد جایگزینی بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر خوردگی را نشان داده‌اند. در حالی در درصدهای جایگزینی بیش‌تر در مقایسه با ۱۰ درصد جایگزینی، عملکرد مطلوب نبوده است. در همین زمینه Shekarchi و همکارانش [17] اثرات جایگرینی متاکائولن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد را بر خواص دوام بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جایگزینی متاکائولن موجب بهبود ۵۰٪، ۳۷٪، ۲۸٪، ٤۵۰٪ و ٤۷٪ به‌ترتیب در پارامترهای نفوذ آب، نفوذپذیری گاز، جذب آب، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر می‌شود.

مطالعات آزمایشگاهی

در راستای مطالعات آزمایشگاهی قبل از ساخت بتن آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه‌ی سیمان هرمزگان و افزودنی‌های میکروسیلیس و متاکائولن مورد استفاده در طرح‌های اختلاط مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. هم‌چنین مطابق جدول (۲) طرح‌های اختلاط طراحی و آزمونه‌های بتنی ساخته شد. نسبت آب به مواد سیمانی در طرح‌های اختلاط ۰/٤ و مقدار آب ۱٦۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. مصالح سنگی ریز دانه به‌صورت گردگوشه و سیلیسی- آهکی و مصالح سنگی درشت‌دانه به‌صورت شکسته و آهکی با بزرگ‌ترین اندازه ۱۹ میلی‌متر و با نسبت ٦۲ درصد درشت دانه به ۳۸ درصد ریزدانه می‌باشند که از منابع موجود در منطقه‌ی خلیج فارس (شهر بندرعباس) تهیه شده است. هم‌چنین به‌منظور تأمین روانی بتن تازه از مواد فوق روان‌کننده با پایه‌ی کربوکسیلاتی استفاده شده و اسلامپ طرح‌ها بین ۵ تا ۸ سانتی‌متر است. پس از بتن‌ریزی وقالب‌گیری، آزمونه‌های بتنی به‌مدت سه‌روز عمل‌آوری مرطوب شده و پس از آن آزمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در شرایط محیطی آزمایشگاه قرار گرفتند (عمل‌آوری خشک). انتخاب این نوع روش عمل‌آوری به‌منظور شبیه‌سازی ساخت و عمل‌آوری بتن با شرایط محیطی در پروژه‌های جاری کشور می‌باشد.

تشریح آزمایش‌ها و ارائه‌ی نتایج

آزمایش مقاومت فشاری. مقاومت فشاری بتن مهم‌ترین مشخصه‌ی مکانیکی بتن می‌باشد. در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS 1881-116 بر آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر انجام گرفته است [18]. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی طرح‌های اختلاط مختلف در نمودار (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری کلیه‌ی طرح‌های اختلاط حاوی متاکائولن و میکروسیلیس از آزمونه‌ی شاهد بیش‌تر است. دلیل این افزایش بهبود ریزساختار بتن با انجام واکنش‌های ثانویه‌ی پوزولان‌ها می‌باشد. به‌طوری که آزمونه‌ی شاهد C2 کم‌ترین و آزمونه‌ی SF10 بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری را در سن ۲۸ روز دارا می‌باشد. میزان مقاومت فشاری در بین آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن با افزایش درصد جایگزینی پوزولان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با این حال افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیش‌تر از آزمونه‌های حاوی متاکائولن در سن ۲۸ روز می‌باشد. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد، آزمونه‌ی SF5 با افزایش ۷ درصد در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز نسبت به آزمونه‌ی MK5 مقاومت فشاری بیش‌تری دارد. با این حال هر دو آزمونه با ٤۲ درصد، افزایش مقاومت یکسانی از سن ۷ به ۲۸ روز داشته‌اند. در درصد جایگزینی مشابه ۱۰ درصد نیز آزمونه‌ی SF10 در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز به‌ترتیب با ۷ و ۲۷ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به آزمونه‌ی MK10 عملکرد به‌تری داشته است. هم‌چنین بیش‌ترین روند افزایش مقاومت از سن ۷ به ۲۸ روز در بین آزمونه‌های حاوی پوزولان مربوط به آزمونه‌ی SF10 با ۵۲ درصد و کم‌ترین آن مربوط به آزمونه‌های SF7.5 و MK15 با ۳۰ درصد افزایش مقاومت می‌باشد.

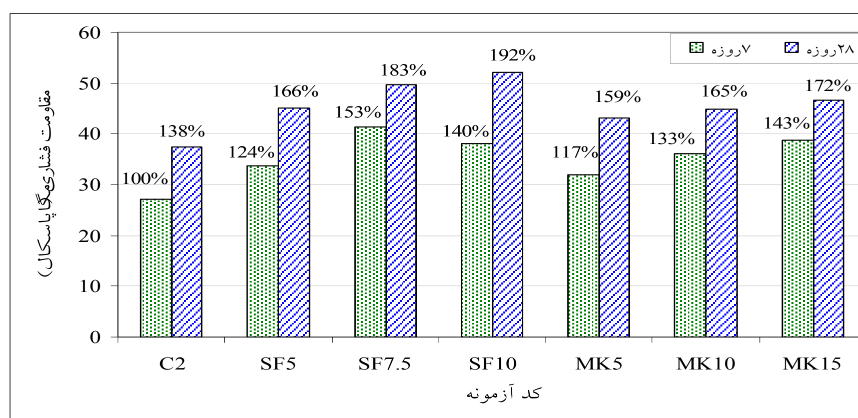
جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی

نوع مواد سیمانی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	٦۳	۱/۸	۱/٦	۰/۵	۰/٦	۲
میکروسیلیس	۹۳/۱٦	۱/۱۳	۰/۷۲	-	۱/٦	۰/۰۵	-	-	۱/۵۸
متاکائولن	۵۱/۸۵	٤۳/۸۷	۰/۹۹	۰/۲	۰/۱۸	-	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۵۷

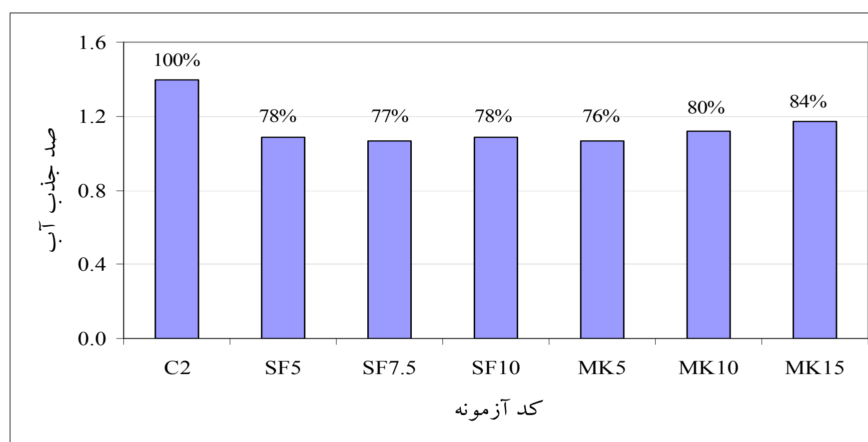
جدول ۲ مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد آزمونه	عیار سیمان(kg/m^3)	پوزولان جایگزین(kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	اسلامپ(cm)
C2	٤۰۰	-	۰/۲	۷
SF5	۳۸۰	۲۰	۱/۲	٦
SF7.5	۳۷۰	۳۰	۱/٤	٥
SF10	۳٦۰	٤۰	۱/٦	۸
MK5	۳۸۰	۲۰	۰/۸	٥
MK10	۳٦۰	٤۰	۱/٤	٥/٥
MK15	۳٤۰	٦۰	۱/٦	۸

C : سیمان
SF : میکروسیلیس
MK : متاکائولن



نمودار ۱ نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی طرح‌های اختلاط مختلف

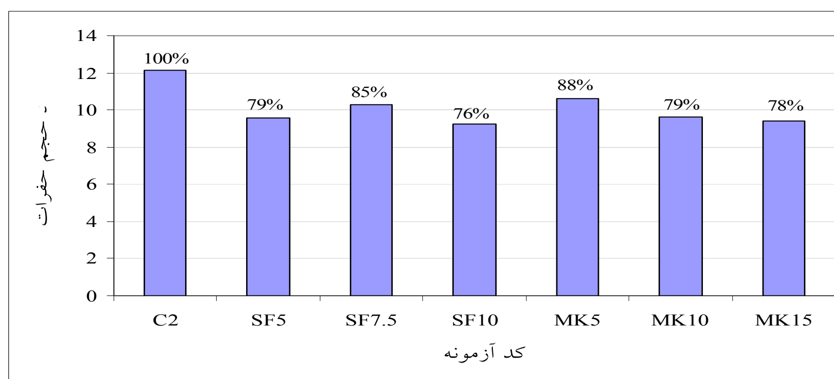


نمودار ۲ نتایج تعیین جذب آب طرح‌های اختلاط مختلف

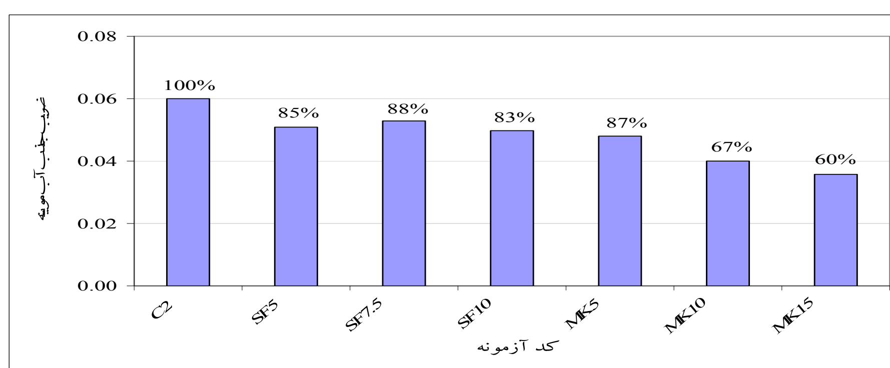
آزمایش جذب آب. آب می‌تواند هم به‌صورت مایع و هم بخار از طریق حفرات مویینه به درون جسم متخلخل وارد شود. منظور از جذب روندی است که طی آن بتن آب را به درون منافذ و حفرات مویینه می‌کشاند. میزان جذب کل معیاری برای پایایی بتن محسوب می‌شود. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C642 انجام شده و نتایج آن در نمودار (۲) ارائه شده است [19]. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان جذب آب کلیه‌ی آزمونه‌های حاوی پوزولان کم‌تر از آزمونه‌ی شاهد می‌باشد. آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس در هر سه درصد جایگزینی مقادیر جذب آب یکسانی را نشان می‌دهند. در بین آزمونه‌های حاوی متاکائولن نیز آزمونه‌ی MK5 مقدار جذب آب کم‌تری را نسبت به درصدهای دیگر جایگزینی‌دارد. مقایسه‌ی درصدهای جایگزینی مشابه ۵ و ۱۰ درصد با اختلاف ناچیز ۲ درصد نشان از میزان جذب آب تقریباً یکسان آزمونه‌هایSF5، MK5 و SF10، MK10 دارد. دلیل عدم تأثیرگذاری درصدهای بیش‌تر جایگزینی پوزولان‌های میکروسیلیس و متاکائولن می‌تواند مربوط به عمل‌آوری کوتاه‌مدت باشد که پوزولان‌ها امکان تأثیرگذاری و انجام کامل عمل هیدراتاسیون را در کوتاه‌مدت نداشته‌اند.

آزمایش تعیین حجم حفرات. نفوذپذیری، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت و پایایی بتن می‌باشد که رابطه‌ی مستقیمی با تخلخل دارد. بنابراین بررسی حجم حفرات بتن اهمیت خاصی دارد. در این تحقیق حجم حفرات آزمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C642 تعیین شده است [19]. نتایج این آزمایش در نمودار (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حجم حفرات آزمونه‌ی شاهد نسبت به دیگر آزمونه‌های حاوی پوزولان بیش‌ترین مقدار را دارد. آزمونه‌ی SF7.5 در بین آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیش‌ترین حجم حفرات را دارد. در حالی که در بین آزمونه‌های حاوی متاکائولن با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، حجم حفرات بتن کاهش می‌یابد به‌طوری که آزمونه‌ی MK15 با ۲۲ درصد کاهش نسبت به آزمونه‌ی شاهد دارای کم‌ترین میزان حجم حفرات می‌باشد. در هر دو درصد جایگزینی مشابه ۵ و ۱۰ درصد نیز آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس به‌ترتیب با ۹ و ۳ درصد کاهش نسبت به درصد مشابه آزمونه‌های حاوی متاکائولن حجم حفرات کم‌تری را دارا هستند.

آزمایش جذب آب مویینه. جذب آب مویینه نیز یکی از پارامترهای مهم ارزیابی دوام بتن می‌باشد. این آزمایش بر اساس استاندارد RILEM-CPC-11.2 انجام شده است و نتایج آن در نمودار (٤) ارائه شده است [20]. همان‌طور که مشاهده می‌شود آزمونه‌ی شاهد بیش‌ترین مقدار جذب آب مویینه را در بین طرح‌های اختلاط مختلف دارا می‌باشد. آزمونه‌ی SF7.5 با ۱۲ درصد کاهش نسبت به آزمونه‌ی شاهد در بین آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارای جذب آب مویینه‌ی بیش‌تری می‌باشد. جذب آب مویینه آزمونه‌های حاوی متاکائولن نیز با افزایش درصد جایگزینی کاهش می‌یابد، به‌طوری که آزمونه‌ی MK15 با ٤٠ درصد کاهش نسبت به آزمونه‌ی شاهد دارای کم‌ترین میزان جذب آب مویینه می‌باشد. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد با اختلاف ناچیز ۲ درصد آزمونه‌های حاوی هر دو پوزولان جذب آب مویینه تقریباً یکسانی داشته‌اند. ولی در درصد جایگزین‌های مشابه ۱۰ درصد آزمونه MK10 با ۲۱ درصد کاهش نسبت به آزمونه‌ی SF10 مقدار جذب آب مویینه کم‌تری داشته است.



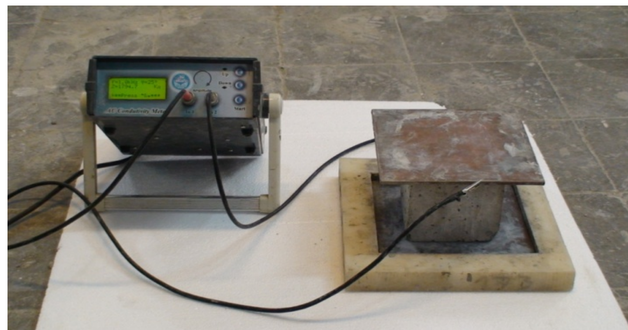
نمودار ۳ نتایج تعیین حجم حفرات طرح‌های اختلاط مختلف



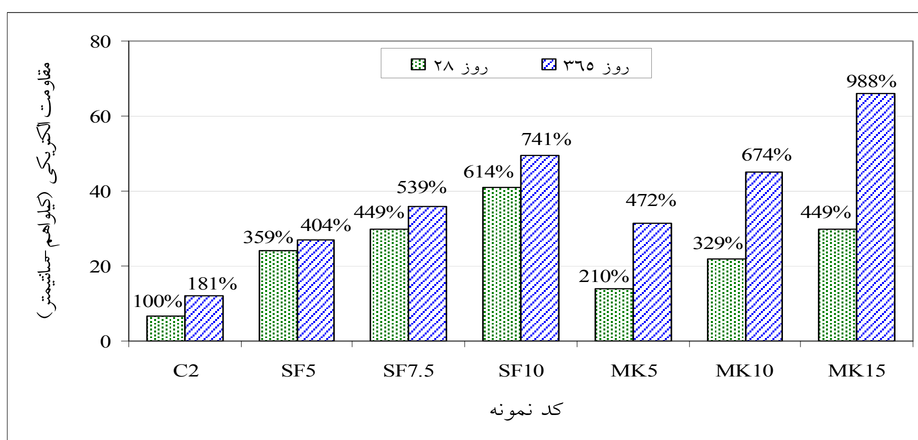
نمودار ٤ نتایج تعیین جذب آب مویینه طرح‌های اختلاط مختلف

آزمایش مقاومت الکتریکی. آزمایش مقاومت الکتریکی در این تحقیق بر اساس روش Impedance Spectroscopy انجام شده است شکل (۱). نمودار (۵) بیانگر نتایج مقاومت ویژه‌ی الکتریکی طرح‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۳٦۵ روز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت ویژه‌ی الکتریکی کلیه‌ی طرح‌های اختلاط حاوی پوزولان در هر دو سن بیش‌تر از آزمونه‌ی شاهد می‌باشد. در آزمونه‌های حاوی پوزولان نیز با افزایش درصد جایگزینی پوزولان مقدار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیز در هر دو سن افزایش می‌یابد به‌طوری که آزمونه‌های SF10 و MK15 به‌ترتیب در بین طرح‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن دارای بیش‌ترین مقاومت الکتریکی می‌باشند. نکته‌ی قابل توجه این است که در سن ۲۸ روزه کلیه‌ی طرح‌های حاوی میکروسیلیس مقاومت الکتریکی بیش‌تری نسبت به طرح‌های متاکائولن دارند در صورتی که در سن ۳٦۵ روز این روند برعکس می‌شود و طرح‌های حاوی متاکائولن مقاومت الکتریکی بیش‌تری دارند. بنابراین مشاهده می‌شود که نرخ افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی از سن ۲۸ به ۳٦۵ روز در آزمونه‌های حاوی متاکائولن بیش‌تر از آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد.

لازم به ذکر است که بر اساس تحقیقات انجام شده [۱] بتن‌های با مقاومت ویژه ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر در برابر نفوذ یون کلر به‌شدت مقاوم هستند. بر این اساس تمامی آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن به‌دلیل داشتن مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بیش‌تر از ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر در مقابل نفوذ یون کلر نیز مقاوم می‌باشند. هم‌چنین جدول (۳) بیانگر رابطه‌ی مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI 222 می‌باشد. با توجه به بیش‌تر بودن مقاومت الکتریکی از مقدار ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر، تمامی آزمونه‌های حاوی هر دو پوزولان در برابر خوردگی نیز مقاومت لازم را خواهند داشت [21].



شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی



نمودار ۵ نتایج مقاومت الکتریکی طرح‌های اختلاط مختلف

جدول ۳ اثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور (ACI 222)

آهنگ خوردگی	مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm)
خیلی زیاد	<۵
زیاد	۵تا۱۰
متوسط تا کم	۱۰ تا ۲۰
ناچیز	>۲۰

آزمایش نفوذپذیری گاز. در این تحقیق، آزمایش نفوذپذیری در مقابل گاز اکسیژن با دستگاه نفوذپذیری انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و روش Cembureau مطابق استاندارد RILEM-TC116 انجام شده است شکل (۲)[22,23]. در این روش ضریب نفوذپذیری ویژه (K) برای گاز اکسیژن که تحت فشار از سطح بتن عبور می‌کند، با رابطه‌ی (۱) به‌دست می‌آید:

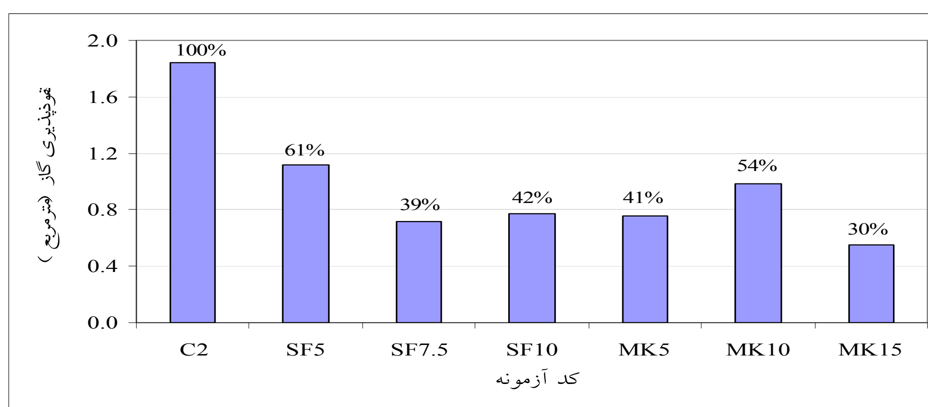
$$k = \frac{2.Q.P_a.L.\eta}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (m^2) \qquad (۱)$$

که در آن k ضریب نفوذپذیری ویژه (m^2)، Q دبی جریان (m^3s^{-1})، A سطح مقطع آزمونه (m^2)، L

ضخامت جریان در جهت جریان (m)، η ویسکوزیته گاز ($N.s.m^{-2}$) ۱۰^-۵×۲/۰۲ برای اکسیژن)، P فشار درونی($N.m^{-2}$)، Pa فشار بیرونی($N.m^{-2}$) می‌باشد [13,14].

بر پایه این روش آزمونه‌های استوانه‌ای، با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به‌ازای هر طرح ساخته می‌شوند و پس از آن عمل‌آوری مرطوب به مدت ۲۸ روز انجام می‌پذیرد. پس از آن، با استفاده از دستگاه برش برای هر آزمونه، سه دیسک با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر از سطح بالای هر استوانه بریده می‌شود. سپس دیسک‌های به‌دست آمده به مدت هفت روز در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود (رژیم B، پیشنهاد شده در روش Cembureau). پس از این مقدمات اولیه، ضریب نفوذپذیری ویژه‌ی هر طرح بر اساس متوسط نتایج مربوط به سه دیسک از هر طرح محاسبه گردیده و نتایج آن در نمودار (٦) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نفوذپذیری گاز آزمونه‌های حاوی پوزولان کم‌تر از آزمونه‌ی شاهد (C2) می‌باشد. در بین آزمونه‌های حاوی پوزولان نیز آزمونه‌هایSF7.5 و MK15 به‌ترتیب با ٦۱ و ۷۰ درصد کاهش نسبت به آزمونه‌ی شاهد در بین آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن به‌ترین عملکرد را داشته‌اند. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد نیز آزمونه‌ی MK5 با ۲۰ درصد کاهش بیش‌تر نسبت به آزمونه‌ی SF5 عملکرد به‌تری داشته است. ولی در درصد جایگزینی مشابه ۱۰ درصد آزمونه‌ی SF10 با ۱۲ درصد کاهش بیش‌تر نسبت به آزمونه‌ی MK10 به‌تر عمل کرده است.

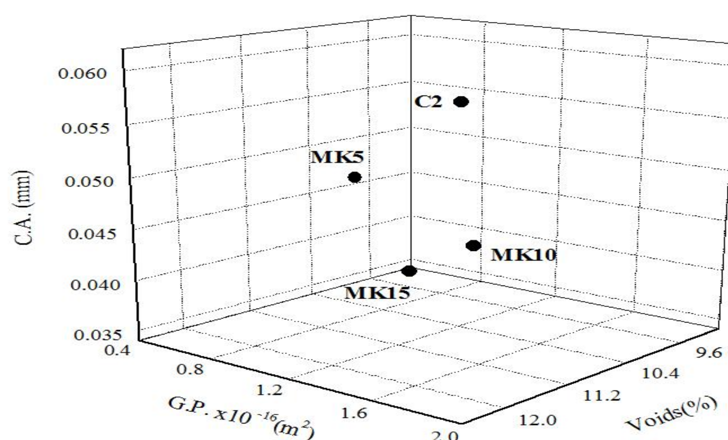

شکل ۲ دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری گاز اکسیژن



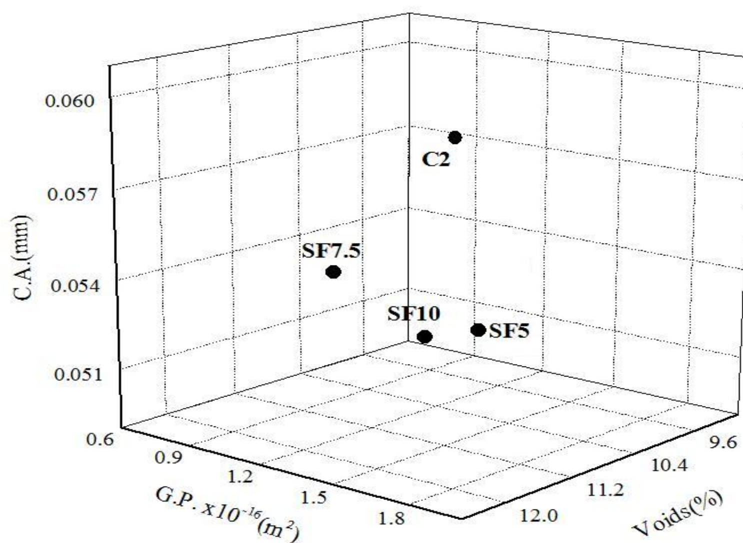
نمودار ٦ نتایج نفوذپذیری در برابر گاز طرح‌های اختلاط مختلف

جمع‌بندی

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد خصوصیات انتقال بتن‌های توانمند، اثرات هم‌زمان نفوذ گاز، جذب آب موینه و حجم حفرات به‌صورت سه‌بعدی در آزمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به‌ترتیب در شکل‌های (۴و۳) ارائه شده است. در این شکل‌ها کم‌ترین مقادیر نشان‌دهنده‌ی بهبود پارامترهای دوام و بیش‌ترین مقادیر بیانگر ضعف در دوام آزمونه‌های مورد نظر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن سه پارامتر مذکور به‌طور هم‌زمان و سه‌بعدی، آزمونه‌ی شاهد در هر دو شکل ضعیف‌ترین عملکرد و آزمونه‌هایMK15 و SF10 به‌ترتیب در بین آزمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به‌ترین عملکرد را داشته‌اند.



شکل ۳ بررسی سه‌بعدی اثرات نفوذ گاز، جذب آب موینه و حجم حفرات در آزمونه‌های حاوی متاکائولن



شکل ٤ بررسی سه‌بعدی اثرات نفوذگاز، جذب آب موینه و حجم حفرات در آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس

جدول ٤ اثر افزایش درصد جایگزینی پوزولان بر پارامترهای مختلف بتن

آزمایش	اثر افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس	اثر افزایش درصد جایگزینی متاکائولن
مقاومت فشاری	↑	↑
جذب آب	–	↑
جذب آب موبینه	–	↓
حجم حفرات	↓	↓
مقاومت الکتریکی	↑	↑
نفوذپذیری گاز	↓	↓

↑: افزایش نسبت به درصد جایگزینی پایین‌تر

↓: کاهش نسبت به درصد جایگزینی پایین‌تر

هم‌چنین اثر افزایش درصد جایگزینی پوزولان بر پارامترهای مختلف دوام بتن که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته در جدول (٤) خلاصه شده است. بر اساس این جدول، در اغلب آزمایش‌ها با افزایش درصد جایگزینی پوزولان بهبود عملکرد را شاهد بودیم که دلیل این امر افزایش فعالیت‌های پوزولانی و کامل‌تر شدن واکنش‌های ثانویه می‌باشد. به‌طور کلی باید توجه داشت که بر اساس تحقیقات انجام گرفته در کاربرد پوزولان‌ها و با توجه به کارآیی مورد نظر باید مقدار بهینه‌ی مصرف آن را تعیین نمود.

در مجموع بر اساس آزمایش‌های انجام شده در قالب تحقیق حاضر، عملکرد آزمونه‌های حاوی پوزولان به‌تر از آزمونه‌ی شاهد بوده است. دلیل این عملکرد انجام واکنش‌های ثانویه‌ی پوزولان‌های مصرفی با $Ca(OH)_2$ و تولید ژل C-S-H است که موجب متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن و کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن می‌شود و نتیجه‌ی آن بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن می‌باشد. در نتیجه با توجه به وجود منابع کائولن در داخل کشور و محدودیت‌های تولید و استفاده از میکروسیلیس به‌خصوص عوارض زیست محیطی آن، متاکائولن می‌تواند جایگزین مناسبی برای میکروسیلیس در پروژه‌های جاری کشور به‌خصوص در مناطق حاد و خورنده‌ی جنوب کشور و منطقه‌ی خلیج فارس باشد.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد این تحقیق با دیدگاه بررسی خصوصیات انتقال بتن‌های توانمند حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به‌عنوان راه‌حلی برای بهبود دوام سازه‌های بتنی در منطقه‌ی خلیج فارس انجام شده است به همین منظور مصالح مورد استفاده برای انجام تحقیق از مصالح موجود در منطقه انتخاب و شرایط عمل‌آوری آزمونه‌ها با توجه به شرایط اجرایی در منطقه در نظر گرفته شده است تا نتایج به‌دست آمده قابلیت اجرایی را در منطقه‌ی خلیج فارس داشته باشد. هم‌چنین در این تحقیق اکثر آزمایش‌های رایج برای بررسی خصوصیات انتقال در آزمونه‌های بتنی انجام شده است تا جمع‌بندی کامل‌تری از نتایج حاصل به‌دست آید. حال با توجه به توضیحات ارائه شده در متن مقاله می‌توان مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱) بررسی خصوصیات مکانیکی آزمونه‌های بتنی نشان می‌دهد که در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز عملکرد مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس با اختلاف اندکی به‌تر از آزمونه‌های حاوی متاکائولن بوده است.

۲) نتایج آزمایش‌های جذب آب و تعیین حجم حفرات نشان می‌دهد که آزمونه‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس عملکرد تقریباً یکسانی داشته‌اند. در

صورتی که نتایج آزمایش جـذب آب مویینـه نشـان از عملکرد به‌تر آزمونه‌های حاوی متاکائولن در مقایسه بـا میکروسیلیس به‌خصوص در درصد جایگزینی‌هـای ۱۰ و ۱۵ درصد دارد.

۳)در بحـث مقاومـت الکتریکـی، آزمونـه‌هـای حـاوی میکروسیلیس در کوتاه‌مدت عملکرد به‌تری نسـبت بـه متاکائولن داشته‌اند درصورتی کـه عملکـرد بلنـدمـدت (یک‌سال) نشان از افـزایش قابـل ملاحظـه‌ی مقاومـت الکتریکی نسبت به سـن ۲۸ روز دارد و در مقایسـه بـا میکروسیلیس هم عملکرد به‌تری داشته است. بنـابراین با توجه به افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومـت الکتریکـی در آزمونه‌های حاوی متاکائولن، این پوزولان می‌توانـد سرعت گسترش خوردگی سازه‌هـای بتنـی در معـرض نفوذ یون کلر (بـه‌ویـژه در منطقـه‌ی خورنـده‌ی خلـیج فارس) را تا حدود زیادی کاهش دهد.

٤) نتایج آزمایش نفوذپذیری گـاز نیـز نشـان دهنـده‌ی عملکرد به‌تر آزمونه‌های حـاوی متاکـائولن نسـبت بـه میکروسیلیس به‌خصوص در درصد جایگزینی بیش‌تـر است.

۵) با توجه به نتایج به‌دسـت آمـده، درصـد جـایگزینی بهینه بـرای میکروسـیلیس ۷/۵ تـا ۱۰ درصـد و بـرای متاکائولن ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌باشد.

٦) عملکرد مناسب متاکائولن در بهبود خـواص پایـایی بتن، با توجه به تنوع معادن کائولن موجود در کشـور و محدودیت منابع پـوزولان‌هـایی ماننـد میکروسـیلیس، مـی‌تـوان از آن بـه‌عنـوان جـایگزین مناسـب بـرای پوزولان‌های مورد اسـتفاده در محـیط‌هـای خورنـده‌ی خلیج فارس استفاده کرد.

مراجع

۱. شکرچی‌زاده، محمد، میردامادی، علیرضا، بنکدار، ابوذر، بخشی، مهدی، "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله‌ی تحقیقات بتن، شماره ۲، صفحات ۵۵-٦۳، (۱۳۸۷).

2. Bonakdar, A.,Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete ContainingHigh Reactivity Metakaolin", *7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Washington DC. USA*, Vol. 1, pp. 228-295, (2005).
3. Changling, H., Osbaeck, B., Makovicky, E., "Pozzolanic reaction of six principal clay minerals : activation reactivity assessments and technological effects", *Cement and Concrete Research*, 25 (8), pp. 1691–1702, (1995).
4. Zhang, M.H., Malhotra, V.M., "Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete", *Cement and Concrete Research*, 25 (8), pp.1713–1725, (1995).
5. Wild, S., Khatib, J.M., Jones, A.,"Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", *Cement and Concrete Research*, 26 (10),pp. 1537–1544, (1996).
6. Brooks, J.J., Johari, M.M.A.,"Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete",*Cement and Concrete Composites*, 23, pp. 495–502,(2001).
7. Bredy, P., Chabannet, M., Pera, J.,"Microstructural and porosity of metakaolin blended cements", *Material Research Society Symposium*, 137, pp. 431–436, (1989).

8. Khatib, J.M., Wild, S.,"Pore size distribution of metakaolin paste", *Cement and Concrete Research*, 26 (10), pp. 1545–1553, (1996).
9. Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., Degeimbre, R.,"Durability of mortars modified with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 473–147, (2003).
10. Razak, H.A., Chai, H.K., Wong, H.S.,"Near surface characteristics of concrete containing supple- mentary cementing materials", *Cement and Concrete Composites*, 26, pp. 883–889, (2004).
11. Curcio, F., Deangelis, B.A., Pagliolico, S.,"Metakaolin as pozzolanic micro filler for high-performance mortars", *Cement and Concrete Research*, 28 (6), pp. 803–809, (1998).
12. Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R.,"Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes",*Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1301–1306, (2001).
13. Potgieter-Vermaak, S.S., Potgieter, J.H., "Metakaolin as an extender in South African cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (4), pp.619–623,(2006).
14. Qian, X., Li, Z.,"The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1607–1611, (2001).
15. Boddy, A., Hooton, R.D., Gruber, K.A.,"Long-term testing of the chloride-penetration resis- tance of concrete containing high-reactivity metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31 (5), pp. 759–765,(2001).
16. Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., Badogiannis, E.,"The effect of metakaolin on the corro- sion behavior of cement mortars", *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 125–130, (2005).
17. Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Near Transport properties in metakaolin blended concrete", *Construction and Building Materials*, (2010). (In press)
18. BS 1881-116,"Testing concrete Method for determination of compressive strength of concrete cubes", (1983).
19. ASTM C642-97,"Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", (1997).
20. RILEM CPC-11.2,"Absorption of water by concrete by capillarity", (1994).
21. ACI 222, "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion", (2001).
22. Kollek, J.J.,"The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation", *Mater. Struct.*, 22(129), pp. 225–230, (1989).
23. RILEM TC 116-PCD,"Tests for gas permeability of concrete – preconditioning of concrete test specimens for the measurement of gas permeability and capillary absorption of water – measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM – CEMBUREAU method – determination of the capillary absorption of water of hardened concrete", (1999).